多泥沙河流水库汛期水沙调控度研究*

张金良 [1,2] 胡春宏 [3] 刘继祥 [1,2] 罗秋实 [1,2] 鲁俊 [1,2*]

[1]（黄河勘测规划设计研究院有限公司 郑州 450003）

[2]（水利部黄河流域水治理与水安全重点实验室（筹） 郑州 450003）

[3]（中国水利水电科学研究院 北京 100038）

摘要：汛期是多沙河流水库调控水沙的关键时期，以往研究和实践中，多以定性或宽泛指标描述水沙调控。因此，建立精确或较准确度量指标体系，研究多沙河流水库汛期水沙调控度对科学认知水库调控能力、指导水库设计运用具有重要意义。根据黄河水沙调度实践，分别定义多沙河流水库汛期径流调控度和泥沙调控度指标，并给出相应的计算表达式；采用 1986 年以后汛期来水来沙量，分析黄河中游干支流水库汛期水沙调控度大小，发现现状已建工程调控度较小，调控能力不足，待建和在建工程调控度较大；进一步采用数学模型对比分析不同水库运用方式对汛期水沙调控度变化影响，结果表明“蓄清调浑”运用相较“蓄清排浑”，不仅可以有效减少不同时期库区泥沙淤积量，而且能够实现部分拦沙库容再生利用，从而提高水库汛期水沙调控度。研究成果可为黄河水沙调控体系构建和多沙河流水库设计运用提供重要依据。

关键词：多沙河流水库　汛期水沙调控度　黄河　蓄清调浑

分类号：TV145

Study on Regulation Degree of Water and Sediment of Reservoirs from Sediment-laden Rivers in Flood Season

Zhang Jinliang[1,2] Hu Chunhong[3] Liu Jixiang[1,2] Luo Qiushi[1,2] Lu Jun[1,2]

[1](Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

[2] (Key Laboratory of Water Management and Water Security for Yellow River Basin, Ministry of Water Resources (under construction), Zhengzhou 450003, China)

[3](China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Flood season is a critical period for reservoirs from sediment-laden rivers to regulate water and sediment. Studying regulation degree of water and sediment of reservoirs from sediment-laden rivers in flood season is of great significance for understanding regulation capability of reservoirs and guiding design and operation of reservoirs. According to the practice of water-sediment regulation in the Yellow River, the runoff regulation degree and sediment regulation degree are defined respectively, also the corresponding calculation expressions are given; the incoming conditions of water and sediment are used to analyze the regulation degree of water and sediment of reservoirs in the middle reaches of the Yellow River, it is found that the existing projects have a small regulation degree and insufficient regulation ability, while the regulating projects to be built or under construction have a large regulation degree; the

*本文系国家重点研发计划基金项目（2016YFC0402503），中国工程院咨询研究项目(2019-XZ-65)的研究成果之一。

作者简介：张金良(1963-)，男，教授级高级工程师，博士，博士生导师，主要从事水利水电工程设计研究。E-mail：jlzhangyrec@126.com

通讯作者：鲁俊(1981-)，男，高级工程师，393956425@qq.com

chinaXiv:202109.00005v1

mathematical model is further used to compare and analyze the influence of different reservoir operation modes on the change of regulation degree of water and sediment in flood season, results show that compare with “storing clean water and discharging muddy flow”, “storing clean water and regulating muddy flow” can not only effectively reduce the amount of sedimentation in the reservoir in different periods, but also realize the regeneration of part of the reservoir capacity, thereby improving the regulation degree of water and sediment of reservoir in flood season. The research results can provide a reference basis for the design and application of reservoirs from sediment-laden rivers.
Keywords: Reservoirs from sediment-laden rivers　Regulation degree of water and sediment in flood season　Yellow River　Storing clean water and regulating muddy flow

chinaXiv:202109.00005v1

1　引言

多沙河流来水来沙主要集中于汛期[1]，汛期是水沙调控的关键时期[2]，水库一般会利用汛限水位以下库容通过合理的水位和泄量控制对入库水沙进行调节。汛期调控能力大小不仅与入库水沙条件和调节库容大小相关，同时受水库运用方式的影响。如何度量多沙河流水库对水沙的调控能力？合理界定度量水库汛期水沙调控能力的科学指标，对指导黄河水沙调控体系的构建和科学运用具有十分重要的意义。

自上世纪50年代至今，我国多沙河流水库设计运用技术不断发展进步，先后经历了“蓄水拦沙”、“蓄清排浑”两个阶段，近期又发展到“蓄清调浑”新阶段[3]。不同阶段水库对水沙调控的理念和作用大小不同。以往研究中，对多沙河流水库的水沙调控研究多集中在水库调度方式[4]、调度指标[5]、调度模型[6]和调度效果[7]等方面。如钱宁[8]指出在多沙河流的治理上，应充分发挥人的主观能动性，利用上游水库合理调节水沙过程，通过人造洪峰、加大洪峰泄量等措施冲刷下游河道。练继建等[9]通过梯级水库联合调度模型对人工塑造异重流调度过程进行了模拟和优化。姚文艺等[10]根据河流动力学原理，分析了水库运用对径流泥沙过程的调节作用及其对下游河道边界条件的影响。胡春宏等[11]系统分析了“蓄清排浑”运用方式对水沙调控的作用，提出了黄河小浪底等多沙河流水库运行方式的优化建议。张金良等[3]研究了多沙河流水库“蓄清调浑”运用方式及其设计技术，指出了“调浑”在水库调度运用中的重要性。但以往诸多研究中，缺少对多沙河流水库汛期水沙调控能力的研究，目前尚无合理度量多沙河流水库汛期水沙调控能力的科学指标，难以定量计算水库在不同时期的水沙调控度以及衡量水库不同运用方式下的水沙调控能力。

本文根据多年研究和黄河水沙调度实践，剖析多沙河流水库汛期水沙调控度的具体含义，给出水库汛期水沙调控度的计算表达式。以黄河流域为研究对象，解析了黄河中游已（在）建和待建水库汛期水沙调控能力，并采用数学模型计算，对比分析了典型水库在“蓄清排浑”和“蓄清调浑”两种运用方式下的水沙调控度变化。研究成果可为多沙河流水库设计运用提供重要参考，为黄河水沙调控体系构建提供依据。

2　研究对象及方法

2.1　研究对象概况

黄河是我国第二大河，发源于青藏高原的约古宗列盆地，流经青海、四川、

甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南、山东 9 省（区），在山东省垦利县注入渤海。干流河道全长 5464km，流域面积 79.5 万 km^2，见图 1。黄河流经多个不同的自然地理单元，流域地形、地貌和气候等条件差别很大，径流主要来自于上游河口镇以上，占全河的 62%，泥沙主要来自于中游河口镇至潼关区间，约占全河的 90%。1919～1959 年人类活动影响较小时期的潼关站多年平均径流量为 426.1 亿 m^3、输沙量为 15.92 亿 t（见表 1），平均含沙量为 37.36kg/m^3，沙量主要集中于汛期，汛期沙量可占全年沙量的 80%以上。

黄河水少、沙多，水沙关系不协调，下游河道淤积成为“地上悬河”[12]，宁蒙河段淤积形成“新悬河”[13]。多年的治黄实践经验证明，通过水库调控水沙对于协调水沙关系具有非常重要的作用[14]。新中国成立以来，不断加强水库工程建设。三门峡水库是黄河中游干流上修建的第一座以防洪为主，兼顾防凌、灌溉、发电、供水等综合利用的大型水利枢纽工程，是黄河流域控制性骨干水库之一。这之后又先后建设了刘家峡、龙羊峡、小浪底等多个大型骨干水利枢纽以及大量发电梯级水库。目前，黄河干流龙羊峡以下已经建成梯级水库 30 座，其中黄河干流中游有 6 座已建水库，自上而下为万家寨、龙口、天桥、三门峡、小浪底、西霞院水库。除此之外，黄河支流也建设了大量水库。

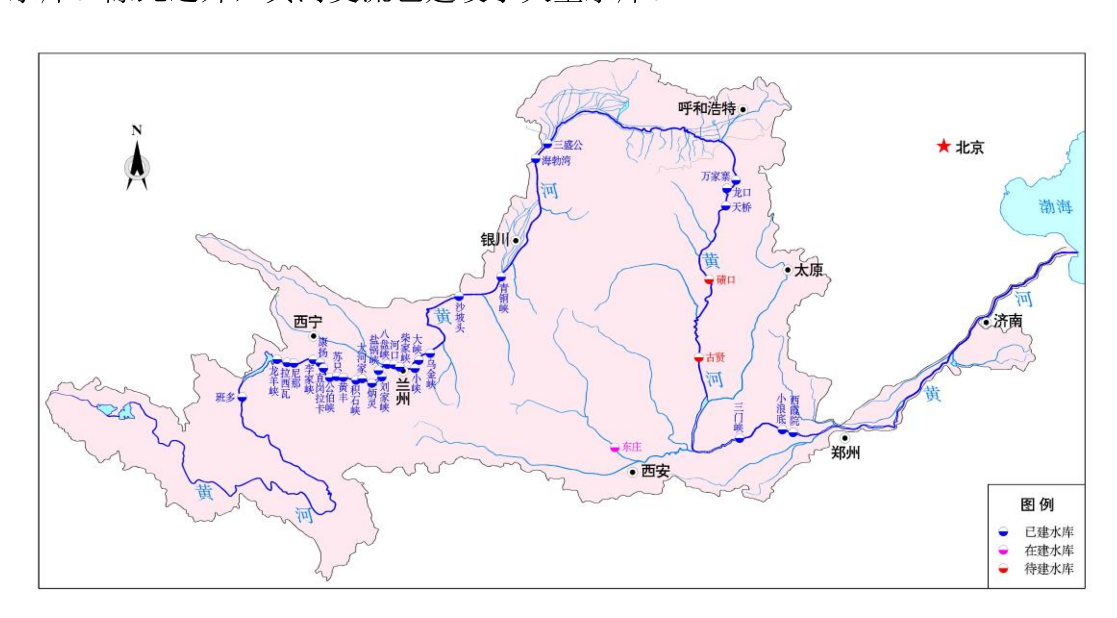


图 1 黄河流域及干支流水库示意图

表 1 黄河干流主要控制站水沙特征值统计表（1919～1959 年）

项目		水量（亿 m^3）			沙量（亿 t）			含沙量（kg/m^3）		
		7～10 月	11～6 月	7～6 月	7～10 月	11～6 月	7～6 月	7～10 月	11～6 月	7～6 月
上游	唐乃亥	111.4	74.1	185.5	0.05	0.02	0.07	0.46	0.22	0.37
	兰　州	187.4	123.1	310.4	0.91	0.20	1.10	4.85	1.60	3.56
	下河沿	184.3	115.7	300.1	1.61	0.24	1.85	8.74	2.08	6.17
	头道拐	155.9	94.8	250.7	1.17	0.25	1.42	7.51	2.64	5.67
中下游	龙　门	196.7	128.7	325.4	9.35	1.25	10.60	47.53	9.73	32.58
	潼　关	259.0	167.1	426.1	13.40	2.52	15.92	51.72	15.11	37.36
	三门峡	259.6	167.3	426.9	13.47	2.59	16.06	51.87	15.50	37.61
	花园口	295.8	184.1	480.0	12.82	2.34	15.16	43.32	12.73	31.59
	利　津	298.7	164.9	463.6	11.45	1.70	13.15	38.34	10.29	28.36

多沙河流水库设计运用技术不断发展，目前已经由“蓄清排浑”发展到“蓄清

chinaXiv:202109.00005v1

调浑”新阶段。“蓄清排浑”时期，水库非汛期蓄水兴利，汛期降低水位排沙，虽然能够在一定程度上实现水库有效库容的保持，但在水库进入正常运用期后汛期仍然面临径流调节几乎为零、泥沙调控库容过小和强迫排沙等问题。“蓄清调浑”是对“蓄清排浑”的进一步创新发展，所谓“蓄清调浑”，是指根据水库开发任务要求，充分考虑多沙河流来水来沙过程中场次洪水和年际间丰、平、枯变化，统筹调节泥沙对水库淤积形态和有效库容的影响，以尽可能提高下游河道水沙关系协调度为核心，设置合适的拦沙和调水调沙库容，通过“拦、调、排”全方位协同调控，实现有效库容长期保持和部分拦沙库容的再生利用、拦沙库容与调水调沙库容一体化使用，即实现部分“水库容”和“沙库容”在一定时段内互换，充分发挥水库对泥沙的“内”调节作用，一定时期或遇有利水沙条件可实现年度径流调节，并通过水库群调度和天然洪水泥沙过程衔接，更好地协调进入下游的水沙关系，以充分发挥水库综合利用效益[3]。现阶段“蓄清调浑”运用及其设计技术已经在黄河上已建的小浪底水库和规划的东庄、古贤等水库中应用。

2.2　汛期水沙调控度定义与表达式

多沙河流水库一般要考虑设置一定的拦沙库容和调水调沙库容，水库运用分拦沙阶段和正常运用阶段。拦沙阶段，水库有一定的淤积量，但设计拦沙库容尚未淤满，汛期可以利用汛限水位以下扣除淤积体后的库容进行水沙调控。正常运用阶段，即设计拦沙库容淤满，汛期只能利用设计汛限水位到死水位之间的库容以及再生利用的拦沙库容进行水沙调控，见图 2。随着入库水沙条件变化和水库淤积边界条件变化，水库汛期水沙调控能力大小也在不断变化。

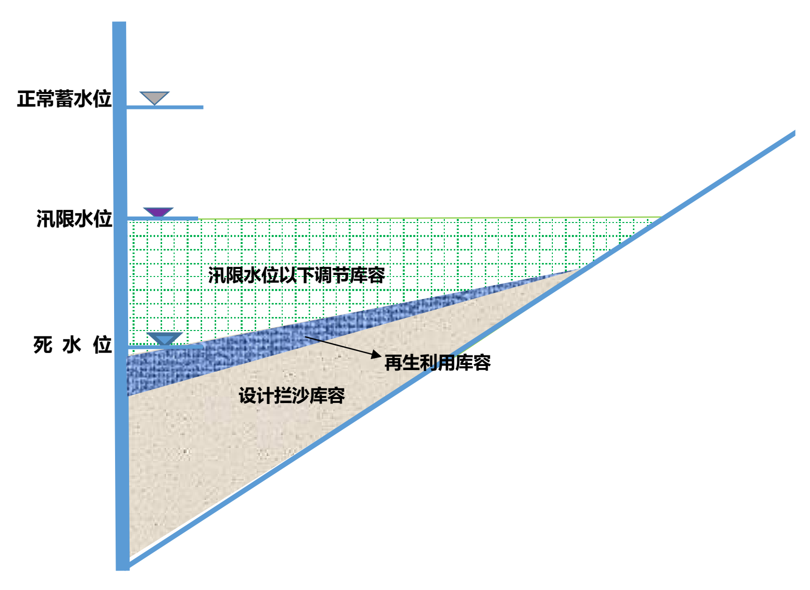


图 2　水库调节库容示意图

根据黄河水沙调度实践，“水沙调控度”是水库对入库水沙过程调控能力大小的度量，当单纯度量以“水”为主的调控能力时称之为“径流调控度”，当单纯度量以“沙”为主的调控能力时称之为“泥沙调控度”。对多沙河流水库汛期径流调控度和泥沙调控度分别定义，径流调控度是指汛限水位以下的平均蓄水量除以汛期多年平均入库径流量，泥沙调控度是指汛限水位以下的调控库容加上再生利用库容除以汛期多年平均入库泥沙量，具体公式如下：

径流调控度：

chinaXiv:202109.00005v1

$$R_{fw}=\frac{V_{fw}}{W_f} \tag{1}$$

泥沙调控度：

$$R_{fs}=\frac{V_r+V_h}{W_{fs}} \tag{2}$$

式中，R_{fw} 为水库汛期径流调控度；R_{fs} 为水库汛期泥沙调控度；W_f 为汛期多年平均入库径流量；W_{fs} 为汛期多年平均入库输沙量；V_{fw} 为水库汛期汛限水位以下的平均蓄水量；V_r 为水库汛限水位以下调控库容；V_h 为再生利用库容。

根据以上公式可以看出，水库拦沙期，随着库区泥沙淤积，汛期水沙调控度是在不断减小的，直至库容淤积达到设计拦沙库容后趋于稳定。汛期水沙调控度越大表示汛期水库对水沙调控的能力越大，反之也越小。

3 黄河中游水库汛期水沙调控度分析

为进一步加深对多沙河流水库汛期水沙调控度的理解，对黄河流域重要水库汛期水沙调控度大小开展研究，初步选定黄河中游万家寨、龙口、天桥、东庄、三门峡、小浪底、西霞院等已（在）建水库和古贤、碛口等规划水库，根据其进入正常运用期后的调节库容大小，采用 1986 年以后的坝址处汛期来水来沙量分别计算各水库汛期水沙调控度。各水库的汛期水沙调控度计算结果可见表 2。

表 2 黄河中游主要水库汛期水沙调控度基本情况

水库名称	控制水文站	汛限水位-死水位（m）	汛期调节库容	再生库容	汛期水量	汛期沙量	径流调控度	泥沙调控度
万家寨	头道拐	966-无	1.87	0.00	65.60	0.26	0.03	9.35
龙口	河曲	893-888	0.45	0.00	82.81	2.78	0.01	0.21
天桥	府谷	834-828	0.28	0.00	74.90	1.08	0.004	0.34
碛口（待建）	吴堡	775-745	14.20	22.16	68.73	1.30	0.21	36.36
古贤（待建）	龙门	617-588	20.00	18.68	88.76	2.46	0.23	20.44
东庄（在建）	张家山	780-156	3.27	4.11	7.99	1.56	0.41	6.15
三门峡	潼关	305-290	0.55	0.00	119.51	3.50	0.005	0.20
小浪底	三门峡	254-230	10.50	0.00	115.16	4.54	0.09	3.01
西霞院	小浪底	131-125	0.59	0.00	101.92	3.47	0.01	0.22

注：水库库容和水量单位为亿 m³，沙量单位为亿 t。

1986 年以后的来水条件下，黄河中游现状已建水库径流调控度较小，主要原因是已建水库中除小浪底外汛期调节库容较小，很难对汛期水沙过程进行大幅调节，这也是当前小浪底调水调沙后续动力不足的主要原因之一[7]。黄河中下游待建或在建水库中，东庄水库作为黄河支流泾河上修建的水库，其汛期多年平均来水量相对较小，径流调控度较大；干流上待建的古贤和碛口水库，其设计的汛期调节库容较大，该二库也具有较大的径流调控度。可见，黄河中游待建水库对黄河中游的径流调控能力大，是黄河中游骨干工程体系的关键性水库。

1986 年以后的来沙条件下，黄河中游现状已建的水库中，万家寨和小浪底

chinaXiv:202109.00005v1

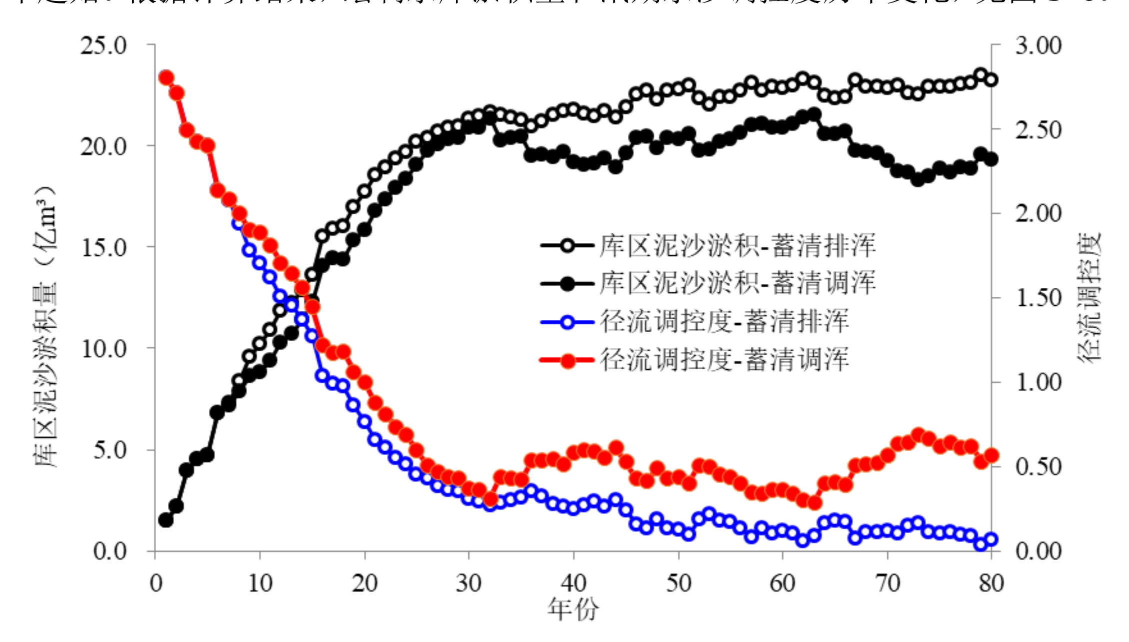
水库泥沙调控度相对较大，而其余已建水库泥沙调控度相对较小。当前，为了对黄河中游汛期泥沙有一定的调节，需要多个水库联合调度，才能发挥出一定的作用。但由于万家寨水库坝址处的来沙量相对较小，因此虽然其泥沙调控度较大，但其在调沙时发挥的作用仍然十分有限。现状工程条件下，黄河调水调沙主要依靠小浪底水库。待建或在建水库中，古贤和碛口有较大的汛期调节库容，泥沙调控度大，对泥沙具有很强的调控能力。在建的泾河东庄水库除了具有一定的汛期调节库容外，由于其规划设计时采用了"蓄清调浑"设计技术，使其具备了部分拦沙库容再生利用能力[3]，能够用于泥沙调节，因此也具有较大的泥沙调控度。

综上分析，黄河中游现状已建水库水沙调控度相对较小，调控能力不足，当前黄河调水调沙主要依靠小浪底水库，但小浪底水库调水调沙后续动力不足，且进入正常运用期后对于水沙调控能力也较为有限。待建和在建的水库均具备较大的水沙调控能力，待其投入使用后，可显著提升黄河中游水库群的水沙调控能力。古贤水库地处晋陕峡谷下段，控制黄河 80%的水量、60%的泥沙和 80%的粗泥沙，1986 年来水来沙条件下，该水库的汛期径流调控度为 0.23、泥沙调控度为 20.44，和小浪底水库相比较，其径流量调控度、泥沙调控度分别是小浪底水库的 2.5 倍和 6.8 倍，说明古贤无论其地理位置还是泥沙调控能力具有无可比拟的优越性、不可替代性，是黄河水沙调控体系的核心工程。

4 不同运用方式对水沙调控度的影响

根据前文分析可知，水库调节库容大小和汛期来水来沙量是影响汛期水沙调控度强弱的直接因素。同时，不同的水库运用方式会影响水库泥沙冲淤和调节库容变化，进而影响到水沙调控能力。以水沙调控度指标为基础，结合 RSS 一维水沙数学模型[14]，计算水库在"蓄清排浑"和"蓄清调浑"两种运用方式下水沙调控度年际变化过程，进一步研究水库运用方式对水沙调控能力的影响。

分别以东庄和小浪底水库为例，依据水库设计运用资料和相关调度运用规程，采用数学模型计算不同时期在"蓄清排浑"和"蓄清调浑"运用方式下，水库淤积量和泥沙调控度变化过程。其中东庄水库尚在建设，计算期开始于水库建成并投入运用，小浪底水库已投入运用，目前处于拦沙后期第一阶段，计算期以 2017 年起始。根据计算结果，绘制水库淤积量和汛期水沙调控度历年变化，见图 3~6。



chinaXiv:202109.00005v1

图 3 东庄水库淤积量和汛期径流调控度历年变化过程

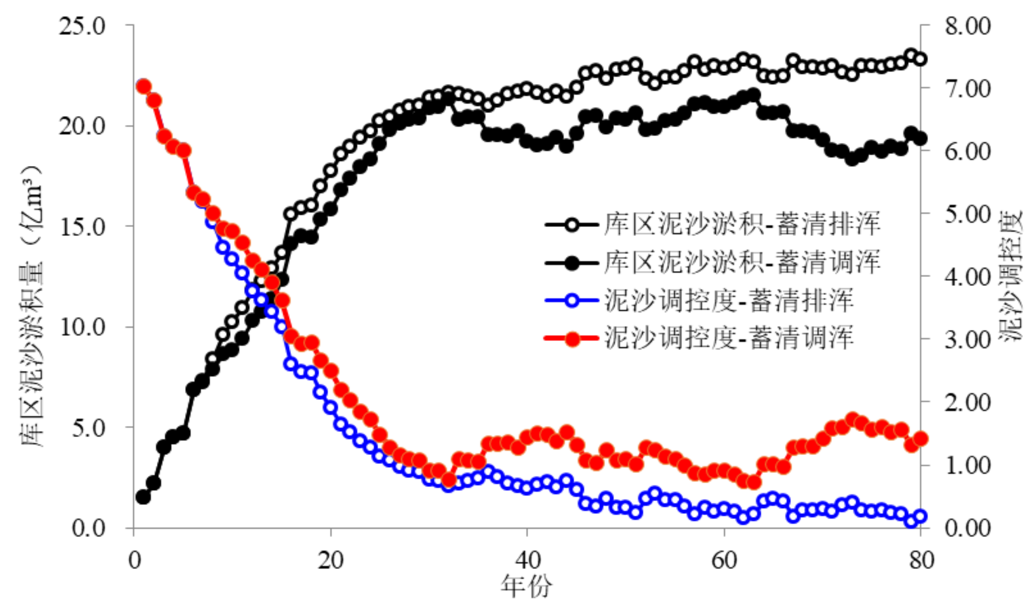


图 4 东庄水库淤积量和汛期泥沙调控度历年变化过程

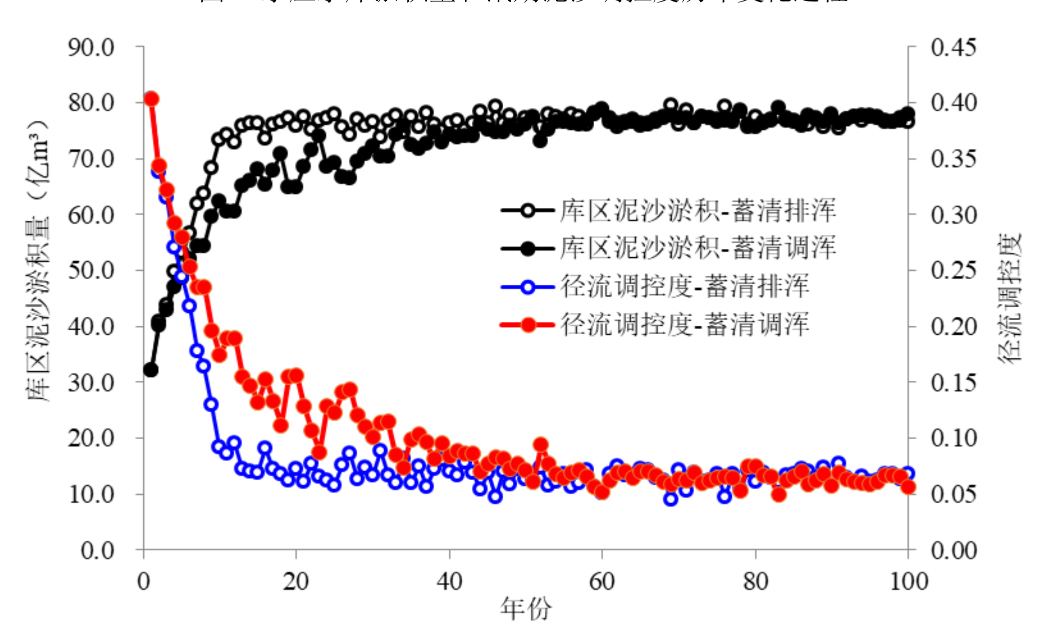


图 5 小浪底水库淤积量和汛期径流调控度历年变化过程

整体来看，两个水库汛期径流调控度和泥沙调控度变化趋势基本一致，都是前期逐渐减小，后逐渐保持稳定。产生这种变化趋势的原因是多沙河流水库在运用中分为拦沙期和正常运用期，拦沙期水库持续拦减入库泥沙，库区泥沙淤积量逐渐增大，调节库容减小，水沙调控度减弱；进入正常运用期水库有冲有淤，基本保持冲淤平衡，调节库容和水沙调控度变化不大。

进一步对比分析“蓄清排浑”和“蓄清调浑”两种运用方式下库区泥沙淤积量和汛期水沙调控度计算结果，可以发现差异主要体现在两个方面：一是拦沙期两个水库在“蓄清调浑”运用方式下库区泥沙淤积量更小，且汛期水沙调控度更大，如计算期第 11 年小浪底水库在“蓄清排浑”运用方式下淤积 74.13 亿 m^3，径流调控度和泥沙调控度分别为 0.1 和 1.7，而在“蓄清调浑”运用方式下仅淤积 60.50 亿 m^3，径流调控度和泥沙调控度为 0.2 和 3.6，调控度大小相差近一倍，产生差异

chinaXiv:202109.00005v1

的原因是“蓄清排浑”仅考虑了汛期水库降低运用水位排沙，而“蓄清调浑”充分考虑了来水来沙过程中场次洪水的水沙搭配关系，通过“拦、调、排”协同调控，能够在长时间尺度内合理调节排沙，减缓水库淤积；二是正常运用期东庄水库在“蓄清调浑”运用方式下年际间库区泥沙淤积量变化更大，且汛期水沙调控度更强，原因是东庄水库在“蓄清调浑”运用中利用双泥沙侵蚀基准面技术[3]，考虑了非常排沙调度，遇有利的丰水年份，可以有效恢复部分拦沙库容再生利用，从而增强汛期水沙调控度，如计算期第 66 年东庄水库在“蓄清排浑”运用方式下淤积 22.44 亿 m^3，径流调控度和泥沙调控度分别为 0.2 和 0.43，在“蓄清调浑”运用方式下淤积 20.69 亿 m^3，径流调控度和泥沙调控度为 0.4 和 0.98，而到了第二年在“蓄清排浑”运用方式下淤积增大到 23.23 亿 m^3，径流调控度减小为 0.1，泥沙调控度减少为 0.18，而在“蓄清调浑” 运用方式下淤积减小到 19.75 亿 m^3，径流调控度增大到 0.5，泥沙调控度增大到 1.27。

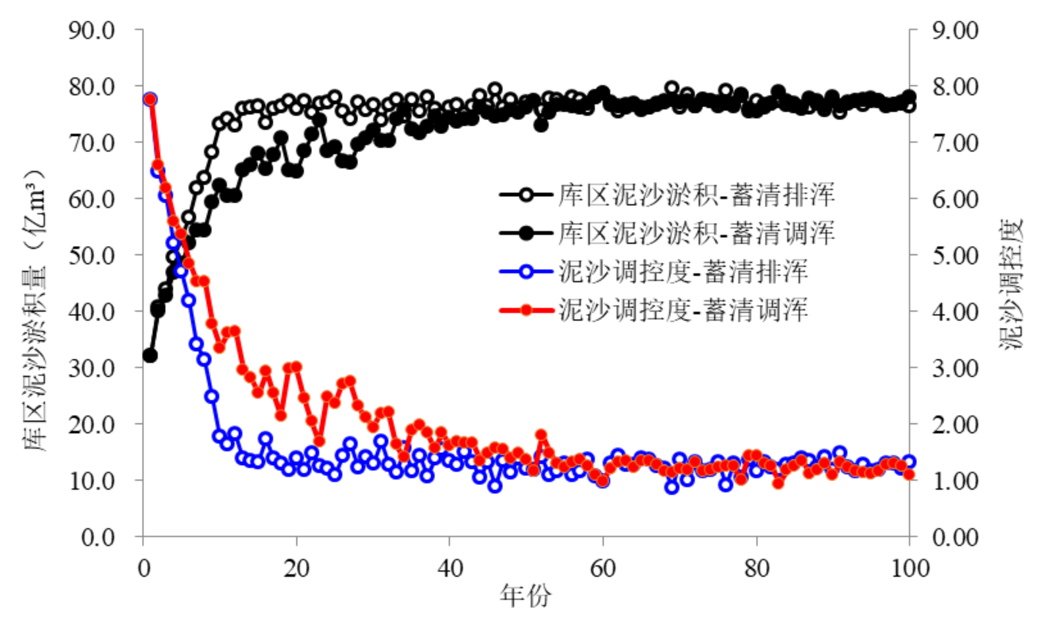


图 6 小浪底水库淤积量和汛期泥沙调控度历年变化过程

不同运用方式下水库汛期水沙调控度对比分析说明：“蓄清调浑”运用相比“蓄清排浑”运用，可以在水库不同运用时期表现出更高的汛期水沙调控度，从而有效提高多沙河流水库对水沙过程的调控效果。

5 总结

（1）为准确或较精确表征多沙河流水库汛期水沙调控能力，建立了汛期水沙调控度定义，给出了计算表达式。以黄河中游水库为研究对象，利用汛期水沙调控度研究了水库汛期水沙调控能力，指出黄河中游现状水库汛期水沙调控能力不足，在建和待建的水库具备较大的水沙调控能力。

（2）根据多沙河流水库汛期水沙调控度定义，结合水沙数学模型，计算研究了东庄、小浪底水库在“蓄清排浑”和“蓄清调浑”两种运用方式下的水沙调控度历年变化过程，结果表明 “蓄清调浑”较“蓄清排浑” 设计技术和运用方式，使水库在汛期有一定的径流调节能力，并可有效减少不同时期库区泥沙淤积量，延长拦沙库容使用寿命，较大幅度提高水库汛期水沙调控度。

（3）在“蓄清调浑”设计技术和运用方式下，对比黄河水沙调控体系各骨干水库的径流调控度和泥沙调控度，结合其控制径流、泥沙特别是粗泥沙程度可

chinaXiv:202109.00005v1

知，古贤水库地处晋陕峡谷下段，控制黄河 80%的水量、60%的泥沙和 80%的粗泥沙，1986 年来水来沙条件下，该水库的汛期径流调控度为 0.23、泥沙调控度为 20.44，和小浪底水库相比较，其径流量调控度、泥沙调控度分别是小浪底水库的 2.5 倍和 6.8 倍，说明古贤无论其地理位置还是泥沙调控能力具有无可比拟的优越性、不可替代性，是黄河水沙调控体系的核心工程。

参考文献：

[1] 胡春宏. 黄河水沙变化与治理方略研究[J]. 水力发电学报, 2016, 35(10):1-11.

[2] 张金良. 黄河调水调沙实践[J]. 天津大学学报, 2008(09):1046-1051.

[3] 张金良，胡春宏，刘继祥. 多沙河流水库"蓄清调浑"运用方式及其设计技术[J].水利学报,2021,52(S):1-10.

[4] 李国英. 黄河调水调沙[J]. 中国水利, 2002(11):34-38+10.

[5] 韩其为. 小浪底水库初期运用及黄河调水调沙研究[J]. 泥沙研究, 2008, 000(003):1-18.

[6] 罗秋实. 基于非结构网格的二维及三维水沙运用数值模拟技术研究[D]. 武汉大学, 2009.

[7] 陈翠霞，安催花，罗秋实，等. 黄河水沙调控现状与效果[J].泥沙研究,2019,44(02):69-74.

[8] 钱宁，张仁，赵业安，等. 从黄河下游的河床演变规律来看河道治理中的调水调沙问题[J].地理学报,1978(01):13-24.

[9] 练继建，万毅，张金良. 异重流过程的梯级水库优化调度研究[J].水力发电学报,2008(01):18-23.

[10] 姚文艺，侯素珍，丁赟.龙 羊峡、刘家峡水库运用对黄河上游水沙关系的调控机制[J].水科学进展,2017,28(1):1-13.

[11] 胡春宏. 我国多沙河流水库"蓄清排浑"运用方式的发展与实践[J].水利学报,2016,47(03):283-291.

[12] 安催花，鲁俊，吴默溪，等. 黄河下游河道平衡输沙的沙量阈值研究[J].水利学报, 2020, 51(4): 402-409.

[13] 鲁俊，安催花，吴晓杨. 黄河宁蒙河段水沙变化特性与成因研究[J].泥沙研究,2018,43(6):40-46.

[14] 张金良，练继建，张远生，等. 黄河水沙关系协调度与骨干水库的调节作用[J].水利学报,2020,51(08):897-905.

(通讯作者：鲁俊 E-mail: 393956425@qq.com)

作者贡献声明：

张金良：提出研究思路，设计研究方案；

张金良：进行实验；

张金良：采集、清洗和分析数据；

张金良：论文起草；

张金良：论文最终版本修订。

chinaXiv:202109.00005v1